

基于小流域尺度的县域国土空间生态修复分区 ——以山西汾河上游为例

付扬军¹, 师学义²

(1. 中国人民大学公共管理学院, 北京 100872; 2. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

摘要: 县域国土空间生态修复是生态修复规划体系的重要一环, 也是生态修复工程项目实施的直接上位指导性规划, 基于小流域尺度的生态修复分区研究可以为黄土高原地区县域生态修复分区的理论和实践提供有益参考。以汾河上游为例, 首先, 基于数字高程模型提取地形特征的方法确定了89个小流域单元, 进而定量评估水源涵养、水土保持、生物多样性、食物供给四种典型生态系统服务, 综合识别区域主导生态功能, 据此划定5个生态功能分区; 然后, 以生态功能分区内生态群落为基础, 通过对不同生态群落的生态功能统计比较, 划分12个生态修复分区; 最后, 将小流域合并得到沟域生态系统单元, 进而划分了25个生态修复工程分区统筹后期工程项目实施, 并提出相应的生态修复策略。本文提出新的生态修复分区思路, 以期为县域国土空间生态修复规划的编制提供指引。

关键词: 小流域; 生态功能; 生态群落; 生态修复分区; 汾河上游

面对过去十多年经济高速发展带来的人地生态环境的矛盾冲突, 党的“二十大”报告明确提出要坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理, 要加快实施重要生态系统保护和修复重大工程。1949年以来, 不同部门已经实施过三北防护林建设等工程并取得显著成就^[1-3], 但随着人类活动的日益频繁广泛所引发的新的系统性生态环境问题和全球气候环境的不断恶化, 实施国土空间生态修复已然成为关系国家生态安全和民生福祉的重大战略^[4,5]。2020年9月, 自然资源部发布《关于开展省级国土空间生态修复规划编制工作的通知》, 对省级国土空间生态修复规划的编制提出了要求, 但县级生态修复规划还处于探索阶段, 尤其是针对生态环境脆弱但生态功能重要的黄土高原县域如何实现人地系统耦合更加具有重要意义。

国土空间生态修复分区是开展生态修复的前提基础, 也是生态修复工程项目部署的上位指导规划^[6]。目前, 国内外学术文献对生态修复分区的研究集中在对研究范式、划分尺度和修复对象等的探讨。在研究范式上, 基本形成了基于生态系统服务^[7,8]、生态安全格局^[9,10]、综合指标框架^[11,12]、主导生态功能^[13,14]等的研究范式; 在划分尺度上, 以省市区行政单元^[10,15,16]、流域尺度^[7,17]、城市群^[18,19]、重点生态功能区^[7,8]等的修复分区研究为主; 在修复对象上, 从早期聚焦于单一生态系统的试验研究^[20-25], 发展到重视山水林田湖草沙

收稿日期: 2022-11-14; 修订日期: 2023-03-02

基金项目: 中国人民大学“中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金; 国土资源部公益性行业科研专项经费课题(201411007)

作者简介: 付扬军(1995-), 男, 山西吕梁人, 博士研究生, 主要从事国土空间生态修复研究。

E-mail: fuyangjun@ruc.edu.cn

通讯作者: 师学义(1960-), 男, 山西祁县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事国土空间综合整治与生态修复研究。E-mail: shixueyi60@163.com

全生态要素的系统性、整体性的保护修复^[4],并开始对生态修复的效益评估、监测监管等进行一系列新的探索^[26]。从总体思路上看,国内生态修复分区的研究基本遵循识别生态问题并提出解决方案的分析框架,往往忽视了以保护措施为主的分区划定,这与国际上生态保护为主、生态修复为辅的理念有所差异,因此,本文在划分生态修复分区的过程中同时考虑了保护和修复区,并提出不同的治理方案。此外,新时代国土空间生态修复分区的研究范式逐步成熟,但在研究尺度上缺乏县域国土空间生态修复分区的研究,尤其是在黄土高原沟壑纵横的地形地貌特征下的研究。过去在黄土高原生态治理的长期实践中,逐步探索出了以小流域为单元的综合治理模式,因此,如何将黄土高原丘陵沟壑区小流域综合治理的经验嵌入到该地貌下的县域国土空间生态修复分区中,还有待进一步研究。

山西汾河上游是国家“两屏三带”生态安全战略格局中北方防沙带和黄土高原—川滇生态屏障的交接处,也是京津冀西部重要生态屏障和“三晋水塔”,山水林田湖草沙自然生态要素齐备,是影响国家生态安全的重要功能区。同时,区内河东、宁武两大煤田是西电东送、西煤东运的能源保障基地。长期以来,由于对资源的过度开采,生态环境承载力下降,脆弱的生态环境也加剧了区域的贫困程度,形成恶性循环。基于此,本文以汾河上游为研究区,构建“生态修复目标确定—生态受损区域识别—生态修复工程项目部署”的框架,系统分析区域生态环境本底和未来生态修复策略,以期为黄土高原生态脆弱区生态修复分区提供理论和实践借鉴。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

汾河是黄河水系的第二大支流,也是山西省的母亲河。其上游位于山西省忻州市中部,主要包括宁武县和静乐县(图1),地理位置为 $111^{\circ}42' \sim 112^{\circ}36'E$ 、 $38^{\circ}7' \sim 39^{\circ}8'N$,全域总面积为 3981.29 km^2 。属温带大陆性季风气候,多年平均降水量 562 mm ,降雨集中在7-9月份,多年平均气温 6.3°C 。境内地势东西高中间低,海拔最高达 2784 m ,地貌以山地黄土丘陵为主。土壤的垂直分布结构次序鲜明,亚高山草甸为其特有的土壤类型。区内分布有国家级自然保护区、华北最大的亚高山草甸以及华北落叶松最大的林区,生态资源十分丰富。长期以来区域生态系统受到煤炭开采、林木砍伐、水资源过度利用等生产活动的严重破坏,使得对汾河源头区域开展系统性生态修复显得尤为重要。

1.2 数据来源及处理

本文使用的相关数据见表1。以美国陆地卫星计划2017年的Landsat 8遥感影像为基础数据,利用ENVI 5.4软件进行影像预处理,然后解译得到土地利用类型空间分布图,采用实地调研收集的土地利用变更数据和Google高分辨率影像进行数量、空间的精度验证。数字高程模型(DEM)来源于地理空间数据云GDEM产品。气象数据来源于国家气象科学数据服务中心获取的气象站点文本格式数据,通过反距离权重插值法得到空间分布栅格数据。土壤相关数据来源于世界土壤数据库(HWSD)中国土壤数据集。植物群落分布、自然保护区界线等数据来源于实地调研,空间分辨率 $1:10000$ 。社会经济数据来源于县域统计年鉴、统计公报等。

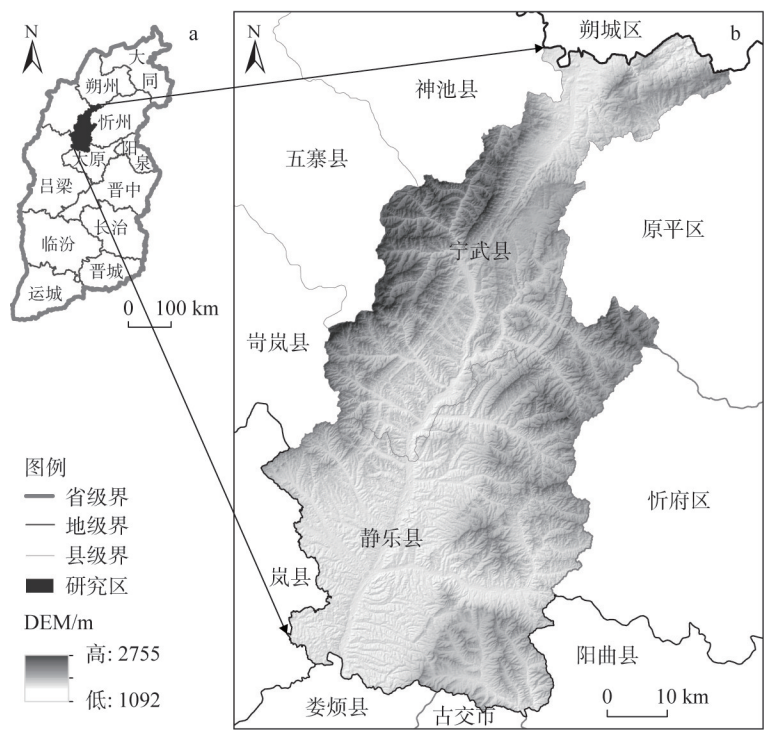


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area (upper Fenhe River)

表1 数据说明

Table 1 Data description

数据	类型	精度	处理	来源
Landsat 8 遥感影像	栅格	30 m	辐射校正、镶嵌、裁剪、监督分类	https://www.usgs.gov
土地利用变更数据	文本	县级	统计分析	原国土资源部门
Google 影像	栅格	1 m	图像增强、裁剪	LocaSpace Viewer
DEM	栅格	30 m	填洼	http://www.gscloud.cn
气象数据	文本	站点	反距离权重插值生成栅格数据	http://data.cma.cn
土壤数据	栅格	30 m	裁剪	http://westdc.westgis.ac.cn
植被数据	矢量	1 : 10000	合并重分类	林业部门
规划界线等	矢量	1 : 10000	坐标转换	实地调研相关部门
社会经济数据	文本	县级	统计分析	实地调研相关部门

1.3 研究方法

1.3.1 生态功能分区单元划分

1949年以来，中国在对黄土高原生态环境问题治理的实践中，逐步探索走出了以小流域为单元综合治理的模式^[27]，通过对沟坡、沟道等采取不同的生物工程措施，实现沟域生态系统内人与自然的和谐共生^[28,29]。本文选取小流域为生态修复过程的基本单元，因为河流的不同部位发挥的生态功能有所不同，因此需要按照河流的上中下游划分不同的小流域单元。同时，考虑到后期工程项目实施、维护的属地管理原则，结合行政区划界线对小流域范围进行修正。

借鉴相关的研究成果^[30]，采取数字高程模型提取地形特征划分小流域的具体方法如下：（1）利用ArcGIS的水文分析模块对研究区DEM填注。因为地表当中地势低洼的区域会使计算水流方向时一定水深下的流向无法赋值或为负值，造成河流的中断，影响后续河网的提取。（2）采用D8算法计算河流的流向，对相邻的8个单元格网编码以指示河流的流向。（3）生成集水面积和河网水系。河流流经区域的流量大小用网格的累计值表示，在累积值达到一定阈值时，地表便会产生径流。（4）河流链接和分水岭的确定。河流的链接代表河流的交汇点，也是下一步提取分水岭的重要参数。（5）小流域边界的修正。首先将得到的栅格形式流域图转化为矢量格式进行拓扑检查，然后利用行政界线修正流域范围。

1.3.2 生态系统服务功能评估

生态系统服务功能是确定生态修复目标的基本依据，也是区域生态系统维持可持续状态的基本要求。本文按照研究区主体功能区划、上位生态功能区划以及当地实际发展条件，明确选取了水源涵养、水土保持、生物多样性和食物供给四项生态系统服务功能进行分析，充分反映区域生态功能空间分异规律，在此基础上识别每个生态功能分区单元的主导生态功能。

（1）水源涵养

本文首先采用基于水量平衡法的 Invest 模型估算产水量，该模块可以通过年降水量、参考蒸散量、土壤最大根系埋藏深度、植物可利用含水量、土地利用类型等一系列参数计算得到产水量^[31]，各参数见表2，计算公式如下：

$$Y(x)=\left(1-\frac{AET(x)}{P(x)}\right)\times P(x)$$
 (1)

式中： $Y(x)$ 为单元 x 的年产水量（mm）； $AET(x)$ 为单元 x 的年蒸散量（mm）； $P(x)$ 为单元 x 的年降水量（mm）。

在产水量估计的基础上，利用地形指数、土壤深度、流速系数等进行修正得到水源涵养量，计算公式如下：

$$R(x)=\text{Min}\left(1,\frac{249}{Velocity(x)}\right)\times\text{Min}\left(1,\frac{0.9TI(x)}{3}\right)\times\text{Min}\left(1,\frac{Ksat(x)}{300}\right)\times Y(x)$$
 (2)

式中： $R(x)$ 为单元 x 的水源涵养量（mm）； $Velocity(x)$ 为单元 x 的流速系数； $TI(x)$ 为单元 x 的地形指数； $Ksat(x)$ 为单元 x 土壤导水率（cm/d）。

（2）水土保持

本文采用修正后的通用土壤流失方程（RUSLE）对水土保持量进行计算^[32]，计算公式如下：

$$U_i=R_i\times K_i\times LS_i\times(1-C_i\times P_i)$$
 (3)

式中： U_i 为单元 i 的土壤保持总量（ $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ ）； R_i 为单元 i 的降水侵蚀性因子； K_i 为单元 i 的土壤可蚀性

表2 产水量模块参数

Table 2 Parameters for the water yield module

土地利用类型	根系深度/mm	流速系数	蒸散系数
耕地	500	1100	0.45
灌木林地	600	600	0.4
园地	550	800	0.7
水域	1	2012	1.12
建设用地	1	2012	0.3
裸地	1	2012	0.5
其他草地	200	1500	0.65
其他林地	1300	380	0.8
天然牧草地	800	400	0.9
有林地	1800	360	1

因子； LS_i 为单元 i 的坡度坡长因子（通过DEM提取）； C_i 为单元 i 的植被覆盖率和作物管理因子； P_i 为单元 i 的水土保持措施因子（林地、耕地、草地、水域、建设用地、裸地分别赋值为0.8、0.45、0.8、0、0、1）。其中， R_i 、 K_i 、 C_i 的计算公式如下：

$$R_i = \sum_{j=1}^{12} \left[1.735 \times 10^{\left[1.5 \times \lg \frac{P_j^2}{P} - 0.8188 \right]} \right] \times 17.02 \quad (4)$$

式中： R_i 为单元 i 的降水侵蚀性因子； P_j 为第 j 月的降水量（mm）。

$$K_i = 0.1317 \times \left\{ 0.2 + 0.3 \times \exp \left[10.0256 \times sa \left(1 - \frac{si}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{si}{ci + si} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25c}{c + \exp(3.72 - 2.95c)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7SN}{SN + \exp(-5.51 + 22.9SN)} \right] \quad (5)$$

$$SN = 1 - \frac{sa}{100} \quad (6)$$

式中： K_i 为单元 i 的土壤可蚀性因子； sa 为砂粒含量（%）； si 为粉粒含量（%）； ci 为粘粒含量（%）； c 为有机碳含量（%）； SN 为中间变量。

$$C_i = \begin{cases} 1 & c = 0 \\ 0.6508 - 0.34361 \times \lg c & 0 < c < 78.3\% \\ 0 & c > 78.3\% \end{cases} \quad (7)$$

$$c = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (8)$$

式中： C_i 为单元 i 的植被覆盖率和作物管理因子； c 代表研究区的植被覆盖度（%）； $NDVI$ 代表植被归一化指数； $NDVI_{\max}$ 、 $NDVI_{\min}$ 分别植被归一化指数的最大值、最小值。

(3) 生物多样性

生物多样性采用Invest模型的Habitat Quality模块进行评估，主要是通过设定不同土地利用类型的威胁因子、生境敏感性等计算每种地类对生物生境的适宜性程度^[33,34]，各参数见表3，计算公式如下：

$$Q_{xj} = H_j \times \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (9)$$

式中： Q_{xj} 为土地利用类型 j 的生境质量值； H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜性； D_{xj} 为土地利用类型 j 的生境退化度； z 、 k 为比例因子。

(4) 食物供给

食物供给是生态系统中维持人类基本生存需要的服务功能，研究区的农产品主要来源于当地，持续增长的人口对农牧产品提出了更高的要求。本文以不同土地利用类型单位面积产值作为评估食物供给能力的指标，借鉴相关研究利用 $NDVI$ 对食物产值统计数据进行空间修正^[35,36]，计算公式如下：

$$G_i = \frac{NDVI_i}{NDVI_j} \times G_j \quad (10)$$

式中： G_i 为单元 i 的食物供给产值

表3 威胁因子参数

Table 3 Threat factor parameter

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰减函数
耕地	1	0.7	线性
城镇	8	1	指数
村庄	5	0.6	指数
独立工矿*	8	1	线性

(元); $NDVI_i$ 为单元 i 的归一化植被指数; $NDVI_j$ 为研究区总的归一化植被指数; G_j 为研究区食物供给总产值 (元)。

1.3.3 生态修复分区划定

生态修复的目标是让退化生态系统在生态重建或人工协助下重新恢复原有的生态功能, 目前认为退化生态系统修复后的状态大致有以下几种类型: (1) 原生态的生态系统, 这是一种未经人类活动干扰的理想生态系统, 显然将这种生态系统作为参照是不切实际的。(2) 适宜本地可持续发展的生态系统, 既包含原生态系统的功能特性, 又蕴含了人类活动参与生态环境演变后的共生特性。(3) 新的不适应于本地禀赋的生态系统。虽然受损生态系统可能停止退化, 但重建后的生态系统可能会开始新的退化过程。

本文将第二种生态系统作为修复目标, 采用本地最适宜的生态系统作为参照基准, 在生态功能分区内划分不同的修复区, 进一步明确生态系统的受损程度, 提高生态修复的针对性。本地生态群落作为气候、水文、土壤、地貌等综合作用的产物, 是长期以来生态环境和人类和谐共生的产物, 而每个生态功能区内生态系统服务功能最强的生态群落可以作为该流域内最适宜的生态系统, 应将其作为其他区域生态修复的参照系。采用 ArcGIS 分区统计工具对不同生态群落的生态功能进行统计, 识别出不同生态功能区内的顶级生态群落作为生态修复的参照系, 进而按照生态功能的大小划分差异性的修复区。同时, 进一步考虑人类生存发展的空间需要, 将人类活动频繁的城镇建设用地、农用地等非植被群落区域进行单独分区。

1.3.4 生态修复工程布局

在明确生态系统问题和修复目标的基础上, 需综合统筹山水林田湖草沙自然生态要素进行工程区划分和项目的部署, 实现河流上中下游、沟顶沟坡沟道的系统性治理。本文将沟域生态系统作为工程分区的基本单元, 也是未来生态修复的具体实施单元, 一个完整的沟域一般包括多个小流域, 各类生态要素齐备, 河流上游发挥水源涵养功能, 中游农业生产密集, 水土流失严重, 下游平坦开阔, 人类活动频繁。以整沟作为工程区可以统筹河流上中下游、干支流、岸上岸下, 并充分考虑沟域内人的生产生活范围, 实现生态在山上、生产在谷底、生活在沟口的三生空间布局。

2 结果分析

2.1 生态功能分区

2.1.1 小流域单元分布

通过采用 DEM 提取地形特征划分小流域生态功能分区单元, 最终获得 89 个小流域单元 (图 2), 其中宁武县 45 个, 静乐县 44 个, 分布相对均匀。小流域单元平均面积 44.74 km^2 , 位于宁武县圪梁乡的 32 号小流域单元面积最小, 仅为 9.93 km^2 , 从图中地形特征可以看出, 该流域单元四周环山, 地理位置相对封闭, 因此构成独立的生态功能分区单元。最大的小流域单元是位于静乐县赤泥洼乡的 84 号, 总面积达到 78 km^2 , 包含了 7 个行政村, 河流从北向南流出境内。

2.1.2 生态系统服务功能分析

在划分生态功能分区单元的基础上, 进一步对研究区水源涵养、水土保持、生物多样性和食物供给四种生态系统服务功能进行定量评估, 评价结果分为栅格尺度和小流域

尺度,见图3和表4。

水源涵养服务方面,栅格尺度产水量分布图显示研究区西侧管涔山、东部山区地带以及中部汾河流经区域产水量较低,而人类活动频繁的城镇工矿建设区产水量更高。究其原因在于,产水量高的地区多为建设用地等不透水表面,降水入渗率低,而东西两侧山区多为林草地,土壤入渗量大,对地表径流的截留作用强,有利于起到涵养水源的能力。值得注意的是,西北区域存在带状分布的产水量高值区,这类区域受煤炭开采影响,地表植被破坏严重造成水源涵养能力下降。进一步通过对产水量的修正以及小流域分区统计,将小流域尺度的水源涵养重要性划分为一般、较重要、重要和极重要四个等级,其中重要、极重要的流域面积占研究区总面积的34.83%。

水土保持服务方面,栅格尺度土壤保持分布图显示研究区西北部管涔山内土壤保持量高,而西南部土壤侵蚀能力强,水土流失严重。主要原因在于,西南地区农业开发强度大,人类活动密集,在长期的生产建设过程中,引起了严重的水土流失问题,而管涔山内植被覆盖率高,受人类活动的干扰相对较少,地表的水土保持能力很强。这与水源涵养的评价结果十分相似,二者都与植被覆盖有高度相关性,在水源涵养生态修

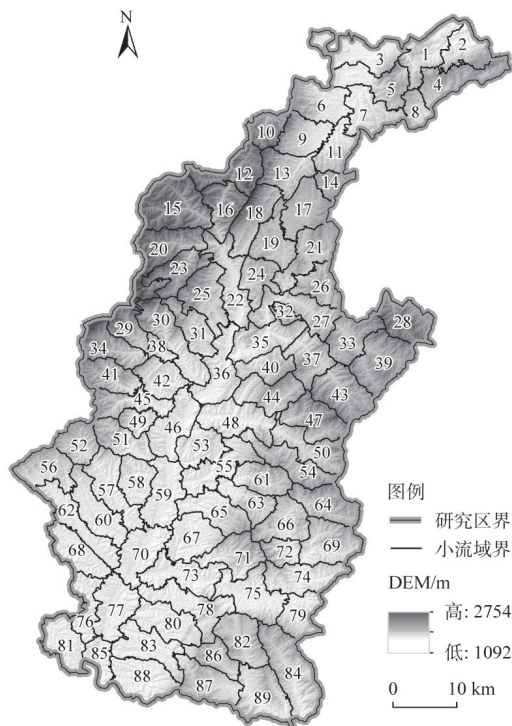


图2 汾河上游小流域单元分布

Fig. 2 Distribution of small watershed units in the upper Fenhe River

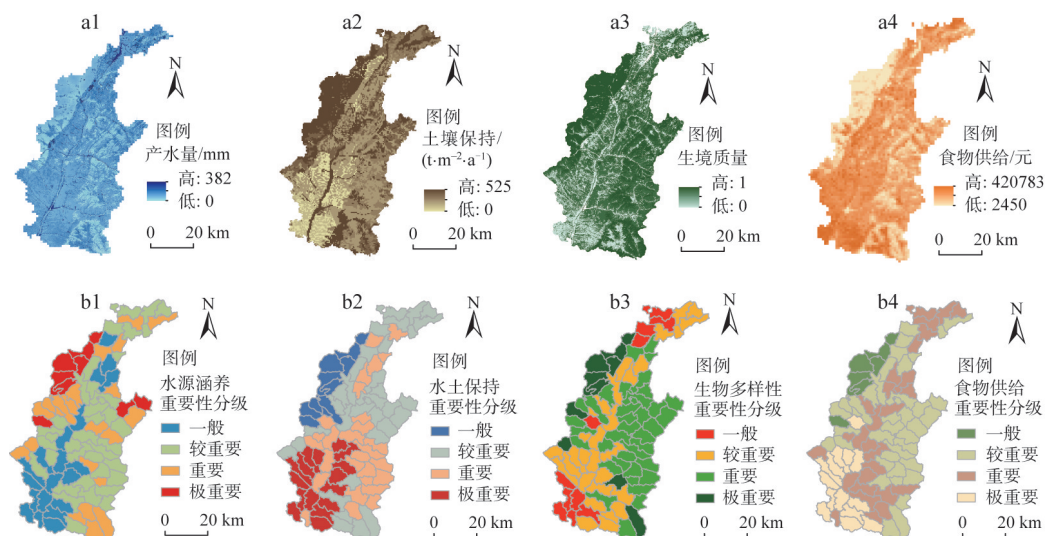


图3 汾河上游生态系统服务功能分布

Fig. 3 Distribution of ecosystem service functions in the upper Fenhe River

表4 生态系统服务功能小流域分区统计
Table 4 Ecosystem service function sub-watershed zoning statistics

重要性分级	水源涵养/km(占比/%)	水土保持/km(占比/%)	生物多样性/km(占比/%)	食物供给/km(占比/%)
一般	943.35(23.69)	474.36(11.91)	484.05(12.16)	336.04(8.44)
较重要	1651.91(41.48)	1579.51(39.67)	1345.39(33.79)	1741.23(43.73)
重要	963.00(24.19)	1172.30(29.44)	1654.20(41.54)	1245.31(31.28)
极重要	423.48(10.64)	755.57(18.98)	498.10(12.51)	659.16(16.55)

复的过程中也间接实现了水土保持的作用。因此，本文将水土流失严重的区域作为水土保持重要的功能区。进一步通过小流域分区统计，将小流域尺度的水土保持重要性划分为一般、较重要、重要和极重要四个等级，其中重要、极重要的流域面积占研究区总面积的48.42%。

生物多样性服务方面，栅格尺度生境质量分布图显示研究区整体水平较高，主要得益于区域林草植被覆盖率高，为动植物的生长提供了良好的生态环境，而生境质量低的地区主要集中在矿区、农业开发区、城镇建设区等，人类活动干扰较大。如西北区域沿山体带状分布的低生境质量区，由于历史原因煤炭开采遗留的大量矿山地质环境问题未得到有效治理，造成生境斑块破碎，生态廊道中断，生物多样性功能下降的状况。进一步通过小流域分区统计，将小流域尺度的水土保持重要性划分为一般、较重要、重要和极重要四个等级，其中重要、极重要的流域面积占研究区总面积的54.05%。

食物供给服务方面，栅格尺度食物供给分布图显示，食物供给能力高的地区主要位于研究区粮食主产区，主要是农业生产所带来的产值，而东西两侧以及城镇开发区食物供给明显较低。进一步通过小流域分区统计，将小流域尺度的水土保持重要性划分为一般、较重要、重要和极重要四个等级，其中重要、极重要的流域面积占研究区总面积的47.83%。

2.1.3 主导生态功能识别及分区

将四种小流域尺度的生态系统服务功能图层叠加，识别每个生态功能分区单元的主导生态功能。具体方法如下：首先将每种生态系统服务重要性分级为重要、极重要的生态功能赋予小流域单元，此时会出现许多小流域拥有多种生态功能或没有被赋予生态功能的情况；然后参考国家自然保护区边界、相关空间规划方案等再明确一部分小流域的主导生态功能类型，对于剩余的小流域采取对不同生态功能的大小进行无量纲化的比较，将生态功能最高的服务赋予该流域单元；最后，结合实地调研获取的农业产业园、局域发展定位等资料做调整。

图4显示了研究区生态功能分区的最终划定结果，包括重点城镇群、水源涵养区、水土保持区、生物多样性保护区、农林牧复合生态区五个生态功能区。水源涵养区面积1442.41 km²，占研究区总面积的36.23%，主要分布在宁武县管涔山、洪河及恢河流域，静乐县赤泥洼地区、东碾河上游，这类地区大多为河流的上游，植被覆盖率高，水源涵养对本地乃至周边其他地区的生态安全都有重要意义。水土保持区面积850.51 km²，占研究区总面积的21.36%，主要分布在南部静乐县境内、北部恢河干流附近，区域人类活动频繁，高强度的土地开发造成了严重的水土流失。生物多样性保护区面积277.94 km²，占研究区总面积的6.98%，主要分布在宁武县芦芽山国家级自然保护区以及东北部高山湖泊地区，这些地区分布有大量珍贵的动植物资源，是华北区域重要的生物资源宝库。农林

牧复合生态区面积 1395.05 km²，占研究区总面积的 35.04%，该功能区是人类活动的重要场所，也是人地矛盾的突出地区，区域食物供给能力高但水土流失问题相对较轻，未来的发展需要进一步保持两类生态功能的平衡。重点城镇群面积 15.38 km²，占研究区总面积的 0.39%，这类地区主要是人类居住、工业生产和服务业发展的必要场地，起到未来引导人口集聚的重要功能，也是研究区占比最小的功能分区。

2.2 生态修复分区

2.2.1 生态群落单元分布

参照研究区植物群落分类体系，进一步划分了 13 种生态群落单元。其中，草丛面积最大，为 1452.39 km²，占研究区总面积的 36.48%，主要分布在研究区的东部山地中。草甸面积最小，仅有 1.01 km²，集中分布于芦芽山深处。

2.2.2 不同生态群落的生态功能分析

从图 5 可以看出，水源涵养功能方面，常绿针叶林能够提供的水源涵养总量最多，达到 $24.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。林地的水源涵养能力整体上高于其他植被类型，因为林地的群落层次丰富，其枯枝落叶、地下强大的根系对降水和地表径流有很强的截留作用，同时，土壤孔隙较大也增强了水源涵养的能力。水土保持功能方面，草甸的水土保持能力最强。草甸土腐殖质层厚，根系深而密，位于研究区国家自然保护区深处。林地的水土保持能力整体高于灌丛和草丛。生物多样性功能方面，常绿针叶林提供的生境功能最强。林地和草甸的生境质量高于其他群落，研究区中国家一级保护动物褐马鸡 (*Crossoptilon mantchuricum*)、金钱豹 (*Panthera pardus*) 等

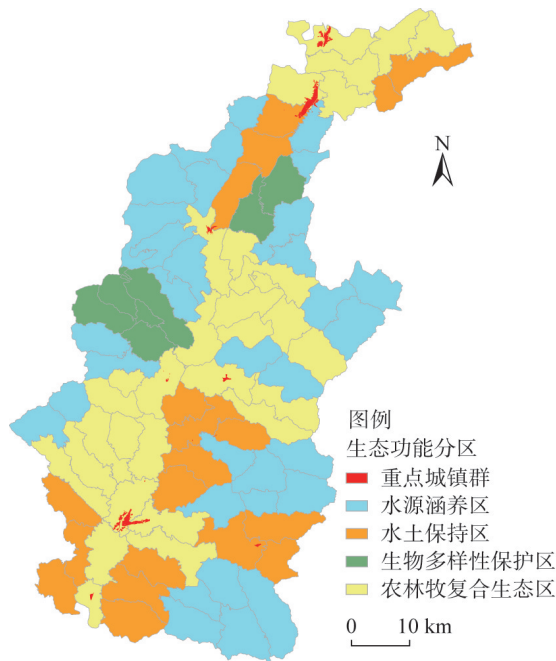


图4 汾河上游生态功能分区

Fig. 4 Zoning of ecological functions in the upper Fenhe River

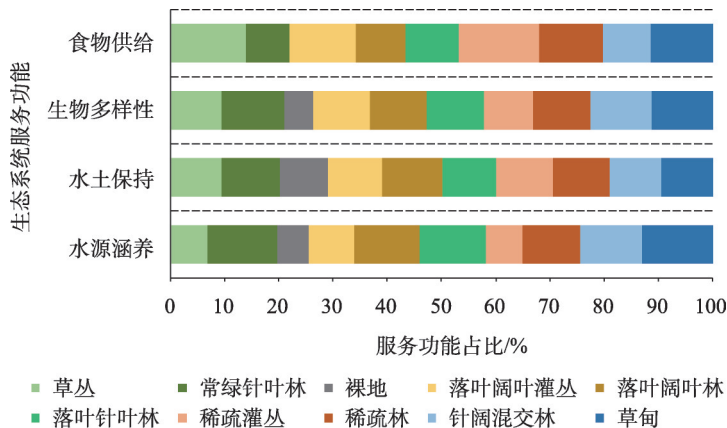


图5 汾河上游不同生态群落的生态功能统计

Fig. 5 Ecological functions statistics of ecological communities in the upper Fenhe River

也生活在这类区域。食物供给功能方面,稀疏灌丛的食物供给能力最强,灌丛和草地的食物供给能力要大于其他群落。

2.2.3 生态修复分区划定策略

对生态功能分区单元内能够提供最多该生态功能的生态群落采取优先保护措施为主,对其他区域采取调控修复的手段。另外,由于农业开发区、人类活动集聚的城镇建设区等区域在生态修复中要更多地考虑人类生存发展的需要,进行生态修复的独立分区,如重点城镇、行政村等划分为城镇优化建设区,河流水域等划分为河湖水生态保护修复区,矿产资源开发区域等划分为矿山生态环境综合治理区,耕地开发区域划分为农用地综合整治区。在水源涵养生态功能区中,将常绿针叶林、草甸、落叶针叶林、落叶阔叶林、针阔混交林划分为水源涵养优先保护区,将稀疏林、落叶阔叶灌丛、草丛、稀疏灌丛和裸地划分为水源涵养调控修复区。在水土保持生态功能区中,将草甸、常绿针叶林、落叶阔叶林、针阔混交林、落叶针叶林划分为水土保持优先保护区,将落叶阔叶灌丛、稀疏林、草丛、稀疏灌丛和裸地划分为水土保持调控修复区。在生物多样性生态功能区中,将常绿针叶林、针阔混交林、草甸、落叶针叶林、落叶阔叶林划分为生物多样性优先保护区,将稀疏林、落叶阔叶灌丛、草丛、稀疏灌丛、裸地划分为生物多样性调控修复区。在农林牧复合生态功能区中,将稀疏灌丛、草甸、草丛、落叶阔叶灌丛、稀疏林划分为农林牧优先保护区,将落叶针叶林、落叶阔叶林、针阔混交林、常绿针叶林、裸地划分为农林牧调控修复区。

在生态修复分区的划定结果中,农用地综合整治区面积最大,达到1087.49 km²,占研究区总面积27.31%;矿山生态环境综合治理区面积最小,占研究区总面积0.51%。农林牧优先保护区面积大于调控修复区,而水源涵养、水土保持、生物多样性的调控修复区面积大于优先保护区。

2.3 生态修复工程分区与策略

2.3.1 生态修复工程分区

山水林田湖草沙构成一个要素完备的生态系统,在部署生态修复工程项目过程中要避免过去“九龙治水”的困境,综合统筹各类生态要素。黄土高原丘陵沟壑区在长期的生态环境治理中,探索走出了整沟治理的实践路径,一个完整的沟域生态系统涵盖了多个小流域,同时发挥着水源涵养、水土保持、生物多样性、食物供给以及提供人类生产生活空间等多项生态功能。因此,在确定生态功能本底、生态问题区域的基础上,将沟域生态系统作为生态修复工程区的划分单元,统筹多种生态系统服务功能和人类生产生活的和谐共生。通过将小流域单元合并,形成生态修复工程分区单元(图6)。

研究区总共划分了25个工程区,宁武县10个,静乐县15个。按照属地管理的原则,将汾河干流划分为宁武段和静乐段。东碾河生态保护修复工程区面积最大,包含了东碾河从入境到下游的整个河段,面积428.28 km²,占研究区总面积的10.76%。岔上河生态保护修复工程区面积最小,为38.31 km²,占研究区总面积的0.96%。整体看,宁武县的工程分区面积普遍大于静乐县。

2.3.2 生态修复策略

在生态修复工程分区中,按照生态修复分区安排不同的项目类型,有机地结合修山、治水、造林、整地、生物多样性丰富等各类工程,综合采取各类技术手段。

水源涵养保护修复区主要分布在宁武县的东寨镇、涔山乡等乡镇与静乐县的娑婆

乡、康家会镇等乡镇。以加强保护和管理为主,尤其是管涔山、芦芽山等是桑干河、北川河等的发源地,应对这类区域严格限制人类活动,如过度放牧、无序采矿、毁林开荒、开垦草地等。继续加强生态恢复和生态建设,治理土壤侵蚀,恢复与重建水源涵养区森林、灌丛、草地、湿地等生态系统,提高生态系统的水源涵养功能和地表径流滞蓄能力,保持区域生态系统的稳定性。

水土保持保护修复区主要分布在宁武县的东马坊乡、化北屯乡等乡镇与静乐县的神峪沟乡和鹅城镇等乡镇。该区域应严禁在陡坡开垦种植,加快实施25°以上坡耕地生态退耕工程,提高植被覆盖率,控制水域流失和地质灾害。在生态保护修复工程项目安排上,主要是植树造林项目和治沟治坡项目,项目建设内容主要包括封禁、水平梯田建设、淤地坝谷坊、荒山绿化、沟道蓄水工程等。

生物多样性保护修复区主要分布在宁武县的西马坊乡、余庄乡、石家庄镇等乡镇。应对动物栖息地加强保护,修建生态廊道和生物岛,确保廊道与廊道之间、廊道与生物岛之间的连通性的畅通,构建基于生物多样性保护的安全格局,营造良好的生物栖息地环境。主要包括对研究区荷叶坪和马伦草原天然亚高山草甸的草地补播及生物灾害防治,对芦芽山国家级自然保护区和天池高山湖泊群的水源补给、拉网封禁、生境恢复等。

农林牧保护修复区主要分布在宁武县的余庄乡、化北屯乡和凤凰镇等乡镇与静乐县的赤泥洼乡、神峪沟乡和王村乡等乡镇。针对研究区农用地细碎化、利用效率低与无序等问题,开展沟坡丘壑农用地整治,结合水土保持工程项目开展耕地坡改梯,对高标准基本农田提质改造。开展全域农地综合整治,项目建设内容主要包括了平整土地、机修梯田、建设田间道路、营造农田防护林、河滩土层浅薄地土层加厚等。

河湖水保护修复区主要分布在宁武县的东化北屯乡、东马坊乡和石家庄镇等乡镇与静乐县的娑婆乡、康家会镇和段家寨乡等乡镇。由于缺乏保护,汾河源头水质受到不同程度的污染,污染源主要有农村生活污染源、农药与化肥污染、分散禽畜养殖和城镇地表径流。该区域主要任务是实施入河排污口整治工程,新建及提标改造污水处理厂,建造垃圾处理处理站,建设生态沟渠、跌水复氧、人工湿地等。并且开展地下水水质保护工程,降低地下水污染风险。



图6 汾河上游生态保护修复工程分区

Fig. 6 Zoning of ecological restoration projects in the upper Fenhe River

城镇村优化建设区主要是分别部署城镇基础设施建设项目和乡村生态环境治理项目,项目建设内容主要包括了县城污水处理厂的扩容提标、垃圾填埋厂的建设、雨污管网的分流改造、整村搬迁复垦、河流沿线村庄污水处理等。而对矿山治理区主要是分别部署地表塌陷及边坡防护治理项目、矿区生态环境修复项目、自然灾害防治项目,项目建设内容主要包括了对煤矸石废渣堆、塌陷区、不稳定边坡、火区等的集中治理,对采空区的土地平整复绿以及对废弃矿区遗留建筑物拆除等。

3 结论与讨论

本文以山西汾河上游为例,首先,采用数字高程模型提取地形特征的方法,确定了89个小流域作为生态修复过程的基本单元,其中,32号小流域单元面积最小,仅为9.93 km²,最大的小流域单元84号,总面积达到78 km²,包含了7个行政村。然后,利用Invest模型、通用土壤流失方程(RUSLE)等方法对水源涵养、水土保持、生物多样性、食物供给等主要生态系统服务功能进行评价,综合识别区域主导生态功能,划分了5个生态功能区,其中水源涵养区面积最大,为1442.41 km²,占研究区总面积的36.23%。进而以13种生态群落为基础,通过对不同生态群落的生态功能分析,划分了12种生态修复分区,其中农林牧优先保护区面积大于调控修复区,而水源涵养、水土保持、生物多样性的调控修复区面积大于优先保护区。最后,将沟域生态系统作为生态修复工程区的划分单元,形成了25个生态修复工程分区,其中东碾河生态保护修复工程区面积最大,为428.28 km²,占研究区总面积的10.76%。在工程分区内有机结合修山、治水、造林、整地、生物多样性丰富等各种手段提出生态修复策略。

本文构建的生态修复分区包含了三级分区体系,其中生态功能分区以小流域为单元,通过识别不同小流域的主导生态功能确定未来生态修复的目标。生态修复分区以生态功能分区内生态群落为单元,通过不同生态群落的生态功能分析识别流域内最适宜的生态系统作为区域生态修复的参照系。生态修复工程分区以小流域合并而来的沟域生态系统为单元,以便在后期工程项目实施中统筹考虑河流上下游、山顶山坡山谷,真正实现生态在山上、生产在谷底、生活在沟口的可持续发展模式。需要说明的是,由于数据和方法的不足,本文对研究区所面临的地下水超采、污染等引发的复合型生态问题有所忽视,未来有待进一步纳入评价体系中。同时,在小流域划分过程中,参数、阈值的设定较为主观,可能会对最终的划分结果有一定影响,但通过实地调研,本文的小流域单元的划分与当地林业部门的长期实践认知相一致。

参考文献(References):

- [1] LI Y, ZHANG X, CAO Z, et al. Towards the progress of ecological restoration and economic development in China's Loess Plateau and strategy for more sustainable development. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: 143676, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143676.
- [2] WANG X M, ZHANG C X, HASI E, et al. Has the Three Norths Forest Shelterbelt Program solved the desertification and dust storm problems in arid and semiarid China?. *Journal of Arid Environments*, 2009, 74(1): 13-22.
- [3] 黄麟, 曹巍, 徐新良, 等. 西藏生态安全屏障保护与建设工程的宏观生态效应. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 398-411. [HUANG L, CAO W, XU X L, et al. The ecological effects of ecological security barrier protection and construction project in Tibet Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(3): 398-411.]
- [4] 曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知. *中国土地科学*, 2019, 33(7): 1-10. [CAO Y, WANG

- J Y, LI G Y. Ecological restoration for territorial space: Basic concepts and foundations. *China Land Science*, 2019, 33(7): 1-10.]
- [5] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 等. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 3-13. [PENG J, LYU D N, DONG J Q, et al. Processes coupling and spatial integration: Characterizing ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 3-13.]
- [6] 王夏晖, 何军, 饶胜, 等. 山水林田湖草生态保护修复思路与实践. *环境保护*, 2018, 46(z1): 17-20. [WANG X H, HE J, RAO S, et al. Design of implementation path of ecological engineering for ecological protection and restoration of multi ecological elements. *Environmental Protection*, 2018, 46(z1): 17-20.]
- [7] 王鹏, 赵微. 典型喀斯特地区国土空间生态修复分区研究: 以贵州猫跳河流域为例. *自然资源学报*, 2022, 37(9): 2403-2417. [WANG P, ZHAO W. Ecological restoration zoning of territorial space in typical karst region: A case study of Maotiao River Basin in Guizhou. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(9): 2403-2417.]
- [8] 刘春芳, 李鹏杰, 刘立程, 等. 西北生态脆弱区省域国土空间生态修复分区. *农业工程学报*, 2020, 36(17): 254-263. [LIU C F, LI P J, LIU L C, et al. Ecological restoration zoning of provincial territorial space in the ecologically fragile areas of Northwest China. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(17): 254-263.]
- [9] 周璟, 王宏卫, 谈波, 等. 开都河流域生态安全格局构建与生态修复分区识别. *生态学报*, 2022, 42(24): 1-11. [ZHOU J, WANG H W, TAN B, et al. Construction of ecological security pattern and identification of ecological rehabilitation zones in Kaidu River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(24): 1-11.]
- [10] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 等. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区: 以徐州市贾汪区为例. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 204-216. [NI Q L, HOU H P, DING Z Y, et al. Ecological remediation zoning of territory based on the ecological security pattern recognition: Taking Jiawang district of Xuzhou city as an example. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 204-216.]
- [11] 张传华, 王钟书, 张凤太, 等. 基于“重要性—脆弱性”分析框架的国土空间生态保护修复分区研究. *地理与地理信息科学*, 2022, 38(6): 1-11. [ZHANG C H, WANG Z S, ZHANG F T, et al. Zoning of ecological protection and restoration for territorial space: Based on "importance-vulnerability" analysis framework. *Geography and Geo-Information Science*, 2022, 38(6): 1-11.]
- [12] 杨庆媛, 张浩哲, 唐强. 基于适应性循环模型的重庆市国土空间生态修复分区. *地理学报*, 2022, 77(10): 2583-2598. [YANG Q Y, ZHANG H Z, TANG Q. Ecological restoration zoning of territorial space in Chongqing city based on adaptive cycle model. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(10): 2583-2598.]
- [13] 蔡海生, 陈艺, 查东平, 等. 基于主导功能的国土空间生态修复分区的原理与方法. *农业工程学报*, 2020, 36(15): 261-270. [CAI H S, CHEN Y, ZHA D P, et al. Principle and method for ecological restoration zoning of territorial space based on the dominant function. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(15): 261-270.]
- [14] 田美荣, 高吉喜, 宋国宝, 等. 基于主导生态功能与生态退化程度的生态修复分区研究. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(1): 7-14. [TIAN M R, GAO J X, SONG G B, et al. Zoning for ecological remediation by dominant ecological function and ecological degradation degree. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(1): 7-14.]
- [15] 蔡海生, 查东平, 张学玲, 等. 基于主导生态功能的江西省国土空间生态修复分区研究. *地学前缘*, 2021, 28(4): 55-69. [CAI H S, ZHA D P, ZHANG X L, et al. Territorial land zoning for ecological restoration in Jiangxi province based on dominant ecological function. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(4): 55-69.]
- [16] 魏露露, 金莲. 基于生态安全格局的国土空间生态修复分区研究: 以贵州省清镇市为例. *环境污染与防治*, 2022, 44(7): 966-971. [WEI L L, JIN L. Research on zoning of ecological restoration in territorial space based on ecological security pattern: A case study of Qingzhen city in Guizhou province. *Environmental Pollution & Control*, 2022, 44(7): 966-971.]
- [17] 张世文, 卜中原, 沈强, 等. 粤北南岭大宝山矿流域山水林田湖草修复阻力与优先级分析. *生态学报*, 2019, 39(23): 8920-8929. [ZHANG S W, BU Z Y, SHEN Q, et al. Resistance and priority analysis of landscape forest fields, lakes, and grass restoration in Dabaoshan mining basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8920-8929.]
- [18] 杨宜男, 李敬, 王立, 等. 长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1555-1571. [YANG Y N, LI J, WANG L, et al. Impact of urbanization on supply and demand of typical ecosystem services in Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6): 1555-1571.]

- [19] 马世发, 劳春华, 江海燕. 基于生态安全格局理论的国土空间生态修复分区模拟: 以粤港澳大湾区为例. 生态学报, 2021, 41(9): 3441-3448. [MA S F, LAO C H, JIANG H Y. Ecological restoration zoning of territorial space based on the pattern simulation of eco-security scenario: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(9): 3441-3448.]
- [20] 樊应凭, 周寅康, 韩博. 国土空间治理视角下苏南地区农用地生态修复分区. 农业工程学报, 2022, 38(1): 287-296. [FAN Y P, ZHOU Y K, HAN B. Ecological restoration zoning of agricultural land of the Sunan district from the perspective of national land and space governance. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(1): 287-296.]
- [21] 张华. 深圳河河口及新洲河河口湿地生态修复思路及管理对策. 水利水电技术, 2015, 46(2): 14-18. [ZHANG H. Concepts and management countermeasures for eco-restoration of wetland of Shenzhen River Estuary and Xinzhouhe River Estuary. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2015, 46(2): 14-18.]
- [22] 第宝锋, 崔鹏, 艾南山. 中国水土保持生态修复分区. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, (5): 32-37. [DI B F, CUI P, AI N S. The study of regionalization on ecological restoration in China. *Advanced Engineering Sciences*, 2008, (5): 32-37.]
- [23] ROMANELLI J P, FUJIMOTO J T, FERREIRA M D, et al. Assessing ecological restoration as a research topic using bibliometric indicators. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 311-320.
- [24] CAIRNS J R J. Recovery and restoration of damaged ecosystems: Proceedings of the International Symposium on the Recovery of Damaged Ecosystems held at Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg: University Press of Virginia, 1977.
- [25] 付战勇, 马一丁, 罗明, 等. 生态保护与修复理论和技术国外研究进展. 生态学报, 2019, 39(23): 9008-9021. [FU Z Y, MA Y D, LUO M, et al. Research progress on the theory and technology of ecological protection and restoration abroad. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 9008-9021.]
- [26] GOCHEVA K, LYU Y, LI F, et al. Ecosystem restoration in Europe: Can analogies to traditional Chinese medicine facilitate the cross-policy harmonization on managing socio-ecological systems?. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 1553-1567.
- [27] 崔景学. 小流域综合治理研究进展. 内蒙古水利, 2017, (8): 43-45. [CUI J X. Advances in integrated small watershed management research. *Inner Mongolia Water Resources*, 2017, (8): 43-45.]
- [28] 冯舒, 赵文武, 陈利顶, 等. 2010年来黄土高原景观生态研究进展. 生态学报, 2017, 37(12): 3957-3966. [FENG S, ZHAO W W, CHEN L D, et al. Advances in landscape ecology in the Loess Plateau since 2010 in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12): 3957-3966.]
- [29] 余新晓, 牛健植, 徐军亮. 山区小流域生态修复研究. 中国水土保持科学, 2004, (1): 4-10. [YU X X, NIU J Z, XU J L. Research on the ecological restoration in mountain watershed. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, (1): 4-10.]
- [30] 刘高焕, 刘俊卫, 朱会议. 基于GIS的小流域地块单元划分与汇流网络计算. 地理科学进展, 2002, 21(2): 139-145. [LIU G H, LIU J W, ZHU H Y. Land-unit based flow network model in small catchment with GIS support. *Progress in Geography*, 2002, 21(2): 139-145.]
- [31] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. 地理研究, 2016, 35(4): 664-676. [BAO Y B, LI T, LIU H, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in Northern Shaanxi province by InVEST model. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 664-676.]
- [32] 肖洋, 欧阳志云, 徐卫华, 等. 基于GIS重庆土壤侵蚀及土壤保持分析. 生态学报, 2015, 35(21): 7130-7138. [XIAO Y, OUYANG Z Y, XU W H, et al. GIS-based spatial analysis of soil erosion and soil conservation in Chongqing, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(21): 7130-7138.]
- [33] 谢余初, 巩杰, 张素欣, 等. 基于遥感和InVEST模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究. 地理科学, 2018, 38(6): 979-986. [XIE Y C, GONG J, ZHANG S X, et al. Spatiotemporal change of landscape biodiversity based on invest model and remote sensing technology in the Bailong River Watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(6): 979-986.]
- [34] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 等. 基于CA-Markov和InVEST模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4106-4118. [CHU L, ZHANG X R, WANG T W, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of urban landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model. *Chinese Journal of Applied Ecology*

- gy, 2018, 29(12): 4106-4118.]
- [35] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1571-1581. [WU W H, PENG J, LIU Y X, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos city. Progress in Geography, 2017, 36(12): 1571-1581.]
- [36] 李军玲, 郭其乐, 彭记永. 基于MODIS数据的河南省冬小麦产量遥感估算模型. 生态环境学报, 2012, 21(10): 1665-1669. [LI J L, GUO Q L, PENG J Y. Remote sensing estimation model of Henan province winter wheat yield based on MODIS data. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(10): 1665-1669.]

Ecological restoration zoning of county-level territorial space based on small watershed scale: A case study of the upper Fenhe River in Shanxi

FU Yang-jun¹, SHI Xue-yi²

(1. Renmin University of China, School of Public Administration and Policy, Beijing 100872, China;

2. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Ecological restoration zoning of county-level territorial space is an important part of the ecological restoration planning system and a superior guiding plan for the implementation of ecological restoration projects. The study of ecological restoration zoning based on small watershed scale can provide useful reference for the theory and practice of county ecological restoration zoning in the Loess Plateau Region. In this paper, taking the upper Fenhe River as an example, firstly, 89 small watershed units were identified based on the DEM to quantitatively assess four typical ecosystem services, namely water conservation, soil and water conservation, biodiversity and food supply, and to identify the dominant ecological functions and accordingly delineate five ecological function zones. Then, based on the ecological communities within the ecological function areas, 12 ecological restoration sub-areas were divided through statistical comparison of the ecological functions of different ecological communities. Finally, the small watersheds were combined to obtain ditch ecosystem units, and then 25 ecological restoration project sub-areas were identified to coordinate the implementation of later projects and propose corresponding ecological restoration strategies. This paper proposes a new idea of ecological restoration zoning, with a view to provide guidance for the preparation of ecological restoration planning in the county-level territorial space.

Keywords: small watershed; ecological function; ecological community; ecological restoration zoning; upper Fenhe River